

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2005 年 9 月 15 日 (15.09.2005)

PCT

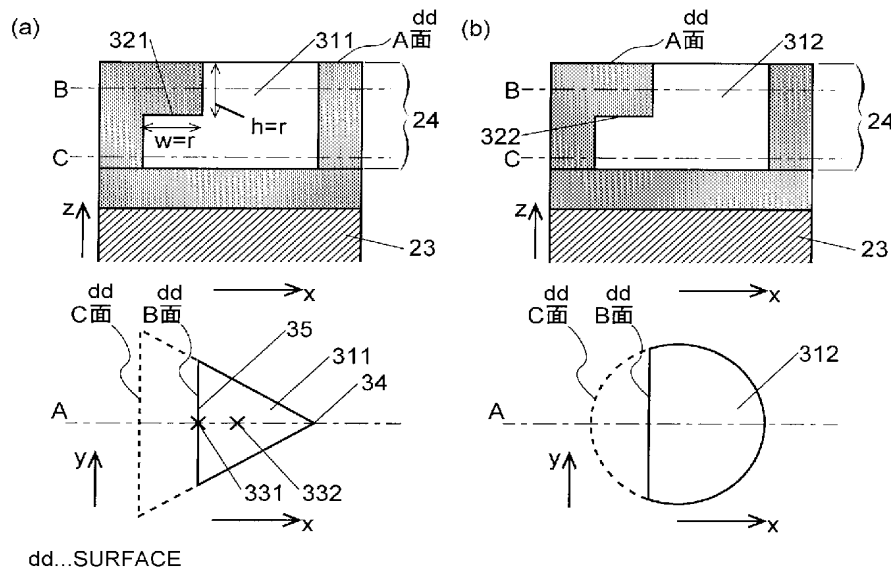
(10) 国際公開番号
WO 2005/086302 A1

- (51) 国際特許分類⁷: H01S 5/183
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2005/003793
- (22) 国際出願日: 2005 年 3 月 4 日 (04.03.2005)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2004-063110 2004 年 3 月 5 日 (05.03.2004) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人京都大学 (KYOTO UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 Kyoto (JP). ローム株式会社 (ROHM CO., LTD.) [JP/JP]; 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町 2 1 番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 野田 進 (NODA, Susumu) [JP/JP]; 〒6158530 京都府京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科内 Kyoto (JP). 宮井英次 (MIYAI, Eiji) [JP/JP]; 〒6158530 京都府京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科内 Kyoto (JP). 大西 大 (ONISHI, Dai) [JP/JP]; 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町 2 1 番地 ローム株式会社内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 小林 良平 (KOBAYASHI, Ryohei); 〒6008091 京都府京都市下京区東洞院通四条下ル元恵王子町 3 7 番地 豊元四条烏丸ビル 7 階 小林特許商標事務所 Kyoto (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR,

[続葉有]

(54) Title: TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL SURFACE-EMITTING LASER LIGHT SOURCE

(54) 発明の名称: 2次元フォトリック結晶面発光レーザ光源



(57) **Abstract:** A surface-emitting laser light source for generating a linearly polarized laser beam having a single-peak beam profile where the intensity at and near the center is the highest. A two-dimensional photonic crystal where a vacancy (311 or 312) is made in a plate (31) and arranged in a tetragonal lattice is disposed on one side of an active layer (23). The planar shape (surface B) of the vacancies (311, 312) shown on the plan view on the emission side is smaller than the planar shape (surface C) on the active layer side. The position of the center of gravity of the planar shape of surface B is apart in the in-plane direction from that of the planar shape of surface C. With this, the symmetry in the plane of the two-dimensional photonic crystal is degraded, and a linearly-polarized single-peak laser beam can be generated.

(57) 要約: 本発明は、直線偏光であって、且つ中心付近の強度が最も強い単峰性のビームプロファイルを有するレーザ光を得ることができる面発光レーザ光源を提供することを目的として成された。活性層 23 の一方の側に、板

[続葉有]

WO 2005/086302 A1



BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE,

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

材31に空孔311又は312を正方格子状に配置した2次元フォトリック結晶を設ける。この空孔311及び312は、発光側の平面(B面)形状が活性層側の平面(C面)形状よりも小さくなるように設定されている。また、B面形状とC面形状の重心の位置は、面内の方向にずれている。これにより、2次元フォトリック結晶の面内の対称性が低くなり、直線偏光であって単峰性のレーザ光を得ることができる。

明 細 書

2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源

技術分野

[0001] 本発明は、平面状の光源から面に垂直な方向にレーザ光を放射する面発光レーザ光源に関する。

背景技術

[0002] 従来より、ファブリ・ペロー共振器を用いたファブリ・ペロー型レーザ光源や、回折格子を用いた分布帰還(Distributed Feedback; DFB)型レーザ光源が用いられている。これらのレーザ光源はいずれも、共振や回折により所定の波長の光を増幅してレーザ光を発振させるものである。

[0003] それに対して、近年、新しいタイプのレーザ光源として、フォトニック結晶を用いたものが開発されている。フォトニック結晶は、誘電体から成る母材に周期構造を人工的に形成したものである。周期構造は一般に、母材とは屈折率が異なる領域(異屈折率領域)を母材内に周期的に設けることにより形成される。その周期構造により、結晶内でブラッグ回折を生じさせ、また、光のエネルギーに関してエネルギーバンドギャップを形成する。フォトニック結晶レーザ光源は、バンドギャップ効果を利用して点欠陥を共振器として用いるものと、光の群速度が0となるバンド端の定在波を利用するものがある。いずれも所定の波長の光を増幅してレーザ発振を得るものである。

[0004] 特許文献1には、2次元フォトニック結晶を用いたレーザ光源が記載されている。このレーザ光源は、2枚の電極の間に発光材料を含む活性層を設け、その活性層の近傍に2次元フォトニック結晶が形成されている。この2次元フォトニック結晶は、板状の部材に2次元的な周期性を持つ屈折率の分布を設けたものである。この周期構造の周期を、活性層で生成される光の媒質内波長に一致させておくことにより、電極からのキャリアの注入により活性層で生成された光は、2次元フォトニック結晶において干渉により強められ、レーザ発振する。

[0005] 特許文献1は、半導体から成る層に円柱状(層の面内では円形)の空孔を周期的(三角格子状、正方格子状、六角格子状等)に設けることにより屈折率分布を形成した

2次元フォトニック結晶を開示している。この場合、活性層からの発光により2次元フォトニック結晶の内部に2次的に定在波が形成される。図1に、2次元フォトニック結晶及びその内部に形成される定在波を模式的に示す。この図では結晶面内の一方向(x方向とする)の定在波のみを1次的に示しているが、例えば正方格子の場合にはそれに垂直な方向にも定在波が形成される。電場のy成分に着目すると、この定在波は、2次元フォトニック結晶11内の空孔12部分に節をもつものと腹をもつものの2つのモードが形成される。ある空孔12の中心を通る軸(z軸)を対称軸と定義すると、その軸に関して前者は反対称であり、後者は対称である。ここで外部平面波との結合を考えると、z方向に伝播する平面波の分布関数は、x方向に関しては一様であるのに対し、対称軸に関しては、反対称モードでは奇関数、対称モードでは偶関数となる。

[0006] 2次元フォトニック結晶の大きさが無限であると仮定すると、対称モードでは外部平面波との重なり積分が0ではないため、面垂直方向への1次回折光が生じる。それに対して、反対称モードでは外部平面波との重なり積分が0になるため、面垂直方向への1次回折光が生じない。そのため、レーザー発振には閉じ込めの強い反対称モードが適しているが、この反対称モードは面垂直方向に取り出すことができない。

[0007] 実際の2次元フォトニック結晶面発光レーザーでは2次元フォトニック結晶の大きさが有限であるため、反対称モードの光も、対称性が崩れ、面垂直方向に取り出すことができる。しかしその場合においても、2次元フォトニック結晶の中心では高い対称性により面垂直方向に光を取り出すことができない。そのため、レーザー光のビームの断面形状(ビームプロファイル)は、中心が強度が低く周囲が強度の高いリング形となる。単一モード光ファイバーとの結合を考慮すれば、ビームプロファイルはこのようなリング形よりも、中心が最も強度の高い単峰形の方が望ましい。

[0008] 特許文献2には、レーザー光の結晶外部への取り出しを改善するために、結晶面に垂直な面における空孔の断面形状が主たる発光方向に向かって漸減している2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザー光源について記載されている。この光源では、レーザー光を2次元フォトニック結晶の一方の面の側から選択的に取り出すことができ、それにより、取り出すレーザー光の強度を全体として強くすることができる。しかし、特

許文献2ではそのビームプロファイルについては検討されておらず、このレーザ光源でビームプロファイルを単峰形にすることはできない。

[0009] 特許文献3には、並進対称性はあるが回転対称性がない格子構造を形成することにより、結晶の母体に平行な面内での対称性を崩した2次元フォトニック結晶を有する面発光レーザ光源について記載されている。このような対称性は、例えば空孔を正方格子状に配置して、各空孔の平面形状を正三角形にすることにより形成される。このレーザ光源では、2次元フォトニック結晶の格子構造の対称性が低いため、2次元フォトニック結晶の中心付近においても反対称モードの光が打ち消されず、それにより、単峰形に近いビームプロファイルを得ることができる。

[0010] また、特許文献3のレーザ光源によれば、格子構造に回転対称性がないことにより直線偏光のレーザ光が得られる。直線偏光のレーザ光は光ファイバーとの結合に有利である。

[0011] 特許文献1:特開2000-332351号公報([0037]～[0056],図1)

特許文献2:特開2003-273455号公報([0016]～[0018],図1～3)

特許文献3:特開2004-296538号公報([0026]～[0037],図1～5)

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0012] 本発明が解決しようとする課題は、ビームプロファイルが単峰形に近く、かつ、直線偏光を有するレーザ光を得ることのできる2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源を提供することである。

課題を解決するための手段

[0013] 上記課題を解決するために成された本発明に係る2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源は、板状の母材にそれとは屈折率が異なる領域を多数、周期的に配置して成る2次元フォトニック結晶と、該2次元フォトニック結晶の一方の側に設けた活性層とを備えるレーザ光源において、

前記異屈折率領域はその平面形状が活性層側よりも活性層の反対側において小さく、活性層側の面における異屈折率領域の重心と該反対側の面における異屈折率領域の重心がずれるように形成されている、

ことを特徴とする。

発明の実施の形態及び効果

- [0014] 本発明に係る面発光レーザ光源では、活性層の一方の側に2次元フォトニック結晶を設ける。但し、活性層と2次元フォトニック結晶は直接接している必要はなく、両者の間にスペーサ等の部材が挿入されていてもよい。活性層には、従来よりファブリ・ペロー型レーザ光源に用いられているものと同様のものを用いることができる。本発明の面発光レーザ光源では、2次元フォトニック結晶の活性層及びその反対側の面からの面発光を利用する。以下では、活性層の反対側の面からの発光を利用する場合を例に説明し、便宜上、活性層の反対側の面を「発光側の面」という。
- [0015] 2次元フォトニック結晶は、板状の母材に、それとは屈折率が異なる領域(異屈折率領域)を多数、周期的に配置することにより形成する。本発明では、異屈折率領域の形状は以下の2つの特徴を有する。(i)板状の母材に平行な面での断面形状(平面形状)が、母材の活性層側よりも発光側の方が小さい。(ii)活性層側の平面形状の重心と発光側の平面形状の重心が面内方向にずれている。
- [0016] 本発明に係る2次元フォトニック結晶はこのような構造を有するため、活性層側から見ると、2次元フォトニック結晶内での異屈折率領域の周期構造は、発光側において対称性が低い。本発明に係る面発光レーザ光源では、電場のx方向及びy方向成分が活性層において主たる成分となる。しかし2次元フォトニック結晶内における電場のz方向(2次元フォトニック結晶に垂直な方向)の成分は活性層側の面よりも発光側の面の方が大きく、それにより、x方向及びy方向を含めた電場の時間平均強度も、活性層側の面よりも発光側の面の方が大きい。本発明では、活性層側の面よりも発光側の面の異屈折率領域の対称性を低くしたことにより、2次元フォトニック結晶内への光の閉じ込めが弱くなり、レーザ光は外部へ放出されやすくなる。
- [0017] また、異屈折率領域の平面形状の重心が、活性層側と発光側とで面内方向にずれていることにより、この2次元フォトニック結晶では母材に垂直な軸の周りの回転対称性を失う。このように結晶の面内方向の対称性が低いことにより、この2次元フォトニック結晶を設けたレーザ光源では、2次元フォトニック結晶の中心付近においても反対称モードの光が打ち消されず、それにより、単峰形に近いビームプロファイルを得るこ

とができる。また、回転対称性がないことにより、上述の通り、直線偏光のレーザ光を取り出すことができる。

- [0018] ビームプロファイルが単峰形に近い直線偏光のレーザ光を取り出すことを目的として、異屈折率領域の面内方向の対称性を低くすることは従来より検討されていた(特許文献3)。本発明では、上述の通り、板状の母材に垂直な方向にも形状の変化をつけるという新規な技術思想により面内方向の対称性を低くしている。そのため、異屈折率領域の形状をより自由に調整することができる。
- [0019] 上記特徴(i)及び(ii)を満たす異屈折率領域は、例えば、表面における平面形状を、活性層側と発光側とで相似形としつつ発光側の方を小さくし、両者の重心の位置をずらすことにより、或いは、発光側の平面形状を活性層側の平面形状の一部を欠いたものとする事により形成することができる。
- [0020] 上記のように活性層側の面と発光側の面で異屈折率領域の平面形状に差異を設ける場合、両面の間の(母材の内部における平面)形状の変化は直線状とすることもできるし、階段状とすることもできる。製造上は階段状とするのが便利である。
- [0021] 上記方策により面内対称性を低くすることに加えて、活性層側及び／又は発光側の平面形状により、更に面内の対称性を低くすることもできる。例えば、活性層側及び発光側の平面形状を正三角形や楕円形にすることができる。これにより、ビームプロファイルの単峰性や直線偏光性をより高めることができる。
- [0022] 異屈折率領域の周期配置には、正方格子、三角格子、六角形のハニカム状等がある。それらのうち、レーザ発振に関わるエネルギーバンドの本数が少ないという点で、正方格子が望ましい。
- [0023] 異屈折率領域は、母材との屈折率の差を大きくすることができるという点、及び製造上の容易さの点から、空孔とすることが望ましい。しかし、製造の際に2次元フォトニック結晶と他の層を高い温度で融着する必要がある場合には、融着時に異屈折率領域が変形することを防ぐために、母材に何らかの部材を埋めこむことにより異屈折率領域を形成してもよい。
- [0024] 本発明の2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源の動作は基本的には従来のものと同様である。電圧の印加により活性層にキャリアが注入され、それにより活性層

内の発光層から発光が得られる。こうして得られた光が2次元フォトニック結晶によりフィードバックを受け、活性層およびフォトニック結晶層で定在波を作り、レーザ発振が起こる。そして、上記条件が満たされていることにより、発光面から面に垂直な方向にレーザ光が放射される。

図面の簡単な説明

- [0025] [図1]2次元フォトニック結晶内の定在波の反対称モードと対称モードを示すグラフ。
[図2]本発明に係る2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源の一実施例を示す斜視図。
[図3]本実施例における2次元フォトニック結晶層内の空孔の形状を示す断面図。
[図4]本実施例の2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源の製造方法の一例を示す断面図及び上面図。
[図5]2次元フォトニック結晶におけるフォトニックバンドの例を示すグラフ。
[図6]比較例における2次元フォトニック結晶層内の空孔の形状を示す断面図。
[図7]図6(a)の比較例における2次元フォトニック結晶内の電場分布及び結晶面から離れた面での電場分布を示す図。
[図8]図3(a)(本実施例)及び図6(a)(比較例)の空孔を用いた場合の2次元フォトニック結晶のQ値を示すグラフ。
[図9]図3(a)の空孔を用いた場合の2次元フォトニック結晶内の電磁場分布を示す図。
[図10]図3(b)(本実施例)及び図6(b)(比較例)の空孔を用いた場合の2次元フォトニック結晶のQ値を示す表。
[図11]図3(b)(本実施例)及び図6(b)(比較例)の空孔を用いた場合の2次元フォトニック結晶内の電磁場分布を示す図。

符号の説明

- [0026] 21…陽電極
22…陰電極
23…活性層
24…2次元フォトニック結晶層

25、311、312、411、412…空孔

261、262、263…スペーサ層

271、272…クラッド層

28…コンタクト層

321、322、422…段差

実施例

[0027] 本発明に係る2次元フォトリソニック結晶面発光レーザ光源の一実施例を、図2を用いて説明する。陽電極21と陰電極22の間に、インジウム・ガリウム砒素(InGaAs)／ガリウム砒素(GaAs)から成り多重量子井戸(Multiple-Quantum Well; MQW)を有する活性層23を設ける。活性層23の上に、p型GaAsから成るスペーサ層261を介して、同じくp型GaAsから成る2次元フォトリソニック結晶層24を設ける。2次元フォトリソニック結晶層24は板材に空孔25を正方格子状に周期的に配置したものである。なお、この図の例ではスペーサ261と2次元フォトリソニック結晶層24は1枚の一体の層として形成され、上側にある2次元フォトリソニック結晶層24の方にのみ空孔25が形成されている。活性層23と陽電極21の間に、p型GaAsから成るスペーサ層262、p型AlGaAsから成るクラッド層271及びp型GaAsから成るコンタクト層28を設ける。また、活性層23と陰電極22の間に、n型GaAsから成るスペーサ層263及びn型AlGaAsから成るクラッド層272を設ける。なお、図2では、2次元フォトリソニック結晶層24の構造を示すために、スペーサ層262と2次元フォトリソニック結晶層24の間を空けて描いた。

[0028] 本実施例のレーザ光源の動作は、基本的には従来の2次元フォトリソニック結晶面発光レーザ光源と同様である。陽電極21と陰電極22の間に電圧を印加すると、陽電極21側から正孔が、陰電極22側から電子が、それぞれ活性層23に注入され、正孔と電子の再結合により発光する。この光が2次元フォトリソニック結晶層24によりフィードバックを受けてレーザ発振する。このレーザ光はコンタクト層28(出射面)から外部に取り出される。

[0029] 本実施例では、図3(a)及び(b)に示す2種類の空孔を用いた。(a)、(b)いずれも、上側の図は板材31に垂直な面(A面)の断面図、下側の図は板材31に平行な面(B面、C面)の断面図(平面図)である。(a)では、空孔311の平面形状は活性層側、発光

側とも正三角形であり、ほぼ中央の段差321により発光側(B面)を活性層側(C面)よりも小さくしたものである。両正三角形は1つの頂点34を共有しているため、両者の重心は底辺に垂直な方向にずれている。図には、一例として、発光側の正三角形の底辺が活性層側の正三角形の重心331上にあるものを示した。(b)では、空孔312は活性層側(C面)において円形であり、発光側(B面)において、その一部を弦により欠いた形状を有する。

[0030] このような空孔311を形成した2次元フォトニック結晶層24を有する面発光レーザでは、仮にB面形状とC面形状が同じであっても、正三角形の空孔による正方格子という構成により面内の回転対称性は低い、上記のようにB面形状とC面形状に違いを設けることにより、面内対称性は更に低くなる。従って、上記空孔312を形成した2次元フォトニック結晶層24を有する面発光レーザでは、このような低い対称性により、単峰形に近いビームプロファイルを有する直線偏光のレーザ光を得ることができる。

[0031] 本実施例の2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源の製造方法を、図4を用いて説明する。なお、陽電極21、陰電極22、活性層23、スペーサ層263、クラッド層271及び272及びコンタクト層28は従来と同様の方法により作製することができるため、以下では2次元フォトニック結晶層24及びその上下にあるスペーサ層261及び262の作製方法について述べる。また、ここでは空孔312を有する2次元フォトニック結晶層24を作製する場合を例に説明するが、空孔311やその他の空孔を有する2次元フォトニック結晶層も同様に作製することができる。

[0032] p型GaAsから成る基板51上に、電子ビーム(EB)描画用のレジスト52を塗布する((a)下図)。次に、レジスト52上の空孔312に対応する位置にEBを照射する。ここで、単位面積あたりのEBの照射時間を、空孔312が発光側には形成されない領域53aよりも、空孔312が活性層側から発光側まで貫く領域53bの方が長くなるようにする((a)上図)。この処理により、レジスト52に、領域53bでは基板51の表面まで貫通し、領域53aではレジスト52の途中まで掘られた階段状の孔54が形成される。なお、図には孔54を1個のみ示したが、実際にはこれをレジスト52に周期的に多数形成する。また、孔54は、ナノインプリント法等の他の方法により形成することもできる。ナノインプリント法は、数ナノメートル程度のサイズをもつパターンのもールドを形成し、これを

レジスト膜に押し付けることでレジストの微細パターンニングを行うものである。

[0033] 次に、塩素ガスによりドライエッチングを行う。エッチングの初期には基板51は表面が露出している領域53bにおいてのみエッチングされる(c)。この時、レジスト52も徐々に塩素ガスによりエッチングされ、やがて領域53aにおいても基板51の表面が露出する(d)。その後は領域53a、53bの双方がエッチングされる。エッチング開始から所定時間経過後、エッチングを終了する。領域53aよりも領域53bの方がエッチングされる時間が長いため、領域53bの方がより深くエッチングされた階段状の空孔312が形成される(e)。基板51のうち、空孔312の領域53b側の底よりも下側がスペーサ層262となる。次に、レジスト52を除去する(f)。

[0034] 2次元フォトリソグラフィ結晶層24と、予め通常の方法により作製された、活性層23上に形成されたp型GaAsから成るスペーサ層261を重ね(g)、200〜700℃に加熱することにより両者を融着する(h)。これにより、本実施例の2次元フォトリソグラフィ結晶面発光レーザー光源が完成する。

[0035] 次に、空孔311及び空孔312を設けた2次元フォトリソグラフィ結晶を有する面発光レーザー光源ににおける、2次元フォトリソグラフィ結晶のQ値等を計算した結果について、比較例を挙げながら説明する。

まず、以下の計算で用いる2次元フォトリソグラフィ結晶のフォトリソグラフィバンドについて説明する。図5(a)は本実施例のように空孔を正方格子状に配置した場合のフォトリソグラフィバンド図である。比較のために、空孔配置を三角格子状とした場合のフォトリソグラフィバンド図を(b)に示す。なお、(a)は空孔を楕円形としたものの計算結果であるが、空孔が他の形状である場合にも基本的には同様である。

(b)の場合は $k=0$ (Γ 点)付近に6本のバンドが形成されるのに対して、(a)の場合、バンドは(b)の場合よりも少ない4本である。この4本のバンドのうち、低エネルギー(低周波数)側の2本のバンドのバンド端A、Bがレーザー発振に寄与する。有限周期構造をもつ実際のデバイスでは通常、 Γ 点付近で平坦な分散関係を持つバンド端BのQ値は大きく下がる傾向があり、 Γ 点付近の傾きの大きいバンド端Aがレーザー発振点に選ばれやすい。そのため、安定なレーザー動作を得るためには、無限周期系においてQ値が、バンド端Bよりもバンド端Aの方においてより高くなるように設計することが望ましい。

。

[0036] 上下面で大きさが異なり重心の位置がずれた空孔311との比較のため、上下面を同一形状とした三角形状の空孔411(図6(a))の場合について計算を行った。図6(a)の2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源は特許文献3に記載のものであり、本実施例と同様に単峰性で直線偏光のレーザ光を得ることを目的としたものである。この場合の、バンド端Aにおける2次元フォトニック結晶内の電場分布を図7(a)に示す。この図において、電場の強度及び方向を矢印の長さ及び方向で示している。x軸方向の電場の成分 E_x はx軸に関して反対称になっているのに対して、y軸方向の電場の成分 E_y はy軸に関して非対称になっている。これは空孔の平面形状がy軸に対して非対称になっているためである。このように E_x の反対称性を保持しつつ E_y の反対称性だけを崩すと、面内の2次元のコヒーレンスを維持しながら直線偏光の光を面外に取り出すことができる。図7(b)に、結晶面から $7a$ (a は正方格子の周期、即ちフォトニック結晶の格子定数)だけ離れた面での電場を示す。y方向に強く偏光しているのがわかる。

[0037] このように、空孔の形状の対称性を崩す(ここでは鏡映対称性を崩した)ことにより光を取り出せるということは、構造によってQ値をコントロールできることを示唆する。実際、円形の平面形状を有する空孔を周期的に無限に配置した構造ではQ値は無限大であるが、三角形の空孔ではQ値は有限となる。そこで、この比較例の空孔411を正方格子状に無限に配置した構造を仮定して、その場合のQ値を3次元FDTD法により計算した結果を図8に示す。図中の白丸印はバンド端Aについて、白四角印はバンド端Bについてそれぞれ計算したものである。ここで、フィリングファクター(FF)は空孔の体積分率であり、本比較例では空孔の面積/ユニットセルの面積で計算される。バンド端Aでは、図7(a)に示すように、空孔を取り囲むように電場が分布しているため、空孔が大きくなるほど構造変化の影響が大きくなる。一方、電場分布は図示していないが、バンド端Bのモードでは電場が空孔を避けるように分布しているため、Q値は10万〜200万程度の高いレベルを維持している。このため、レーザ発振に好適なバンド端Aではなく、バンド端Bのモードがレーザ発振に選ばれる可能性が高い。しかも、Q値が非常に高いため、レーザ光を面外に取り出すことはほとんどできない。実際の

2次元フォトニック結晶では大きさが有限であるため光を面外に取り出すことはできるが、中心の強度が弱いリング形のビーム形状が得られると考えられる。

[0038] そこで、上記比較例とは異なる対称性の崩し方をした、図3(a)に示す空孔311を設けた場合(本実施例)について検討する。この場合のQ値の計算結果を図8に黒丸印(バンド端A)及び黒四角印(バンド端B)で示す。ここでは、図3(a)に示すように、空孔311の、段差321よりも発光側の高さ h 及び段差321のx軸方向の幅 w を共に同じ値 r とし、 $r=0.1a$, $0.13a$, $0.19a$ の場合について計算を行った。FF値(空孔の体積/ユニットセルの体積)はそれぞれ、 0.173 ($r=0.1a$ の場合), 0.164 ($r=0.13a$), 0.140 ($r=0.19a$)となる。FF値が 0.140 の時、バンド端Aでは $Q=5,007.7$ 、バンド端Bでは $Q=2,855.5$ となる。これにより、バンド端BよりもQ値が高いバンド端Aについてレーザ共振を得ることができ、しかもバンド端AのQ値が数千程度の値であるため、中心の強度が強い単峰形のビームを得ることができる。

[0039] 図9に、空孔311を用いた場合における2次元フォトニック結晶内の電磁場分布を示す。この図において、電場の強度及び方向は上記と同様に矢印の長さ及び方向で示し、磁場の強度は色の濃淡で示す。図の中心付近に空孔が存在する。バンド端Aでは空孔付近の電場の強度が強くなるため、面内形状が非対称になることによる影響を強く受けると考えられる。そのため、本実施例のように上下面形状に差異を設けなくともQ値を下げるができる。それに対してバンド端Bでは空孔を避けるように電場が形成されているため、面内非対称性のみならず上下面形状に差異を設けることにより初めてQ値を下げるができる、と考えられる。

[0040] 次に、図3(b)に示した空孔312を設けたレーザ光源について計算を行った結果を示す。比較のため、図6(b)に示す空孔412を設けたレーザ光源についても同様の計算を行った。空孔412は、段差422よりも上側では円であるのに対して、段差422よりも下側では円の一部分を欠いた形状を有するものである。従って、空孔312と412では、発光側の形状と活性層側の形状を入れ替えたようになっている。

[0041] Q値の計算結果を図10に示す。本実施例の方が比較例の場合よりもQ値が小さい。比較例ではバンド端AのQ値が $34,525$ と高いため、バンド端Aに対して選択的に共振が生じ、その光は高いQ値のために外部に取り出し難い。それに対して、本実施例

ではバンド端A、バンド端Bの双方のQ値が数千のオーダーであるため、レーザ共振を得ることができると共に外部にレーザ光を取り出すことができる。

[0042] 平面形状の非対称性が形成されるのは、空孔412では段差422よりも活性層側であるのに対して、空孔312では段差322よりも発光面側である。このことから、平面形状の非対称性を発光面に近いほど強くすることにより、発光面からの光の取り出しがより容易になると考えられる。

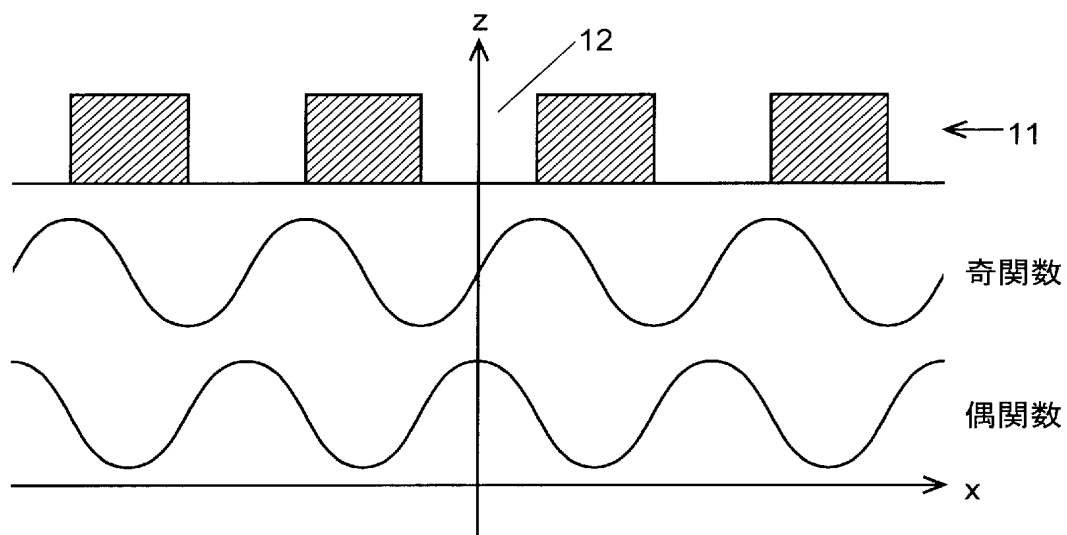
[0043] 図11に、本実施例(空孔312)及び比較例(空孔412)の場合における2次元フォトニック結晶内の電磁場分布を示す。比較例よりも本実施例の方が、そして、バンド端Aよりもバンド端Bの方が、ユニットセルの中心に対して電場分布の節が大きくずれている。このことから、Q値が小さいほど電場分布の対称性が低いといえる。

[0044] 本発明では、上述の通り、単峰性・直線偏光を得ることを目的とした従来の2次元フォトニック結晶面発光レーザ光源よりも異屈折率領域(空孔)の形状を自由に調整することができる。その中で、上述の形状を有する空孔311及び312を用いることにより、単峰性且つ直線偏光であり、更に、強度の強いレーザ光を得ることができる。

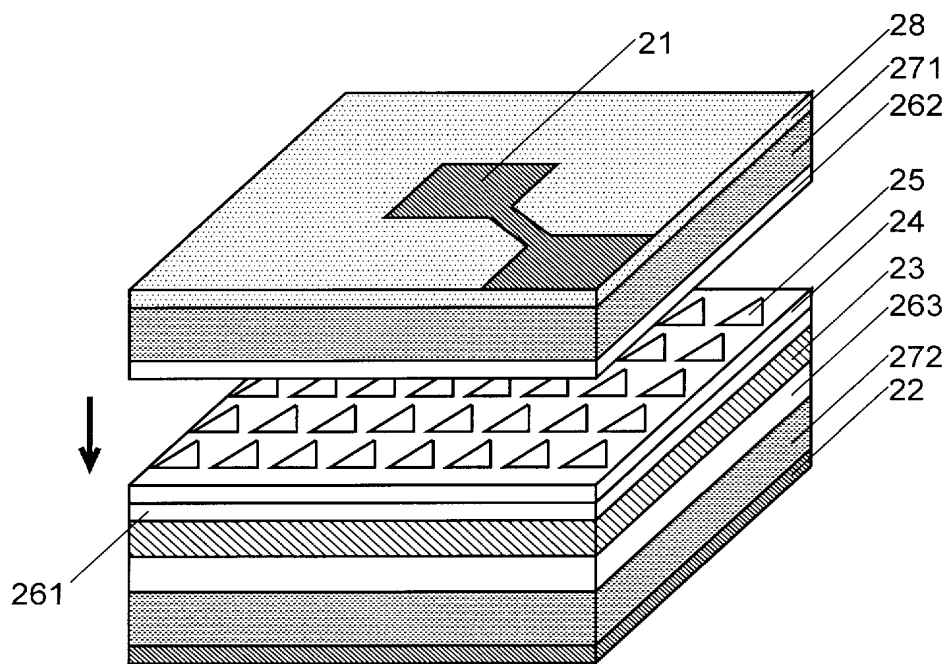
請求の範囲

- [1] 板状の母材にそれとは屈折率が異なる領域を多数、周期的に配置して成る2次元フォトニック結晶と、該2次元フォトニック結晶の一方の側に設けた活性層とを備えるレーザ光源において、
- 前記異屈折率領域はその平面形状が活性層側よりも活性層の反対側において小さく、活性層側の面における異屈折率領域の重心と該反対側の面における異屈折率領域の重心がずれるように形成されている、
- ことを特徴とする2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源。
- [2] 前記異屈折率領域の母材に垂直な面における断面形状が階段状であることを特徴とする請求項1に記載の2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源。
- [3] 前記異屈折率領域の活性層側の面における形状が正三角形であり、活性層の反対側の面における形状がそれよりも小さい正三角形であることを特徴とする請求項1又は2に記載の2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源。
- [4] 前記異屈折率領域の活性層側の面における形状が円形であり、活性層の反対側の面における形状がその円の一部を欠いた形状であることを特徴とする請求項1又は2に記載の2次元フォトニック結晶面を用いた発光レーザ光源。
- [5] 前記異屈折率領域の配置が正方格子状であることを特徴とする請求項1〜4のいずれかに記載の2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源。
- [6] 前記異屈折率領域が空孔又は母材とは屈折率の異なる材料から成る部材により形成されることを特徴とする請求項1〜5のいずれかに記載の2次元フォトニック結晶を用いた面発光レーザ光源。

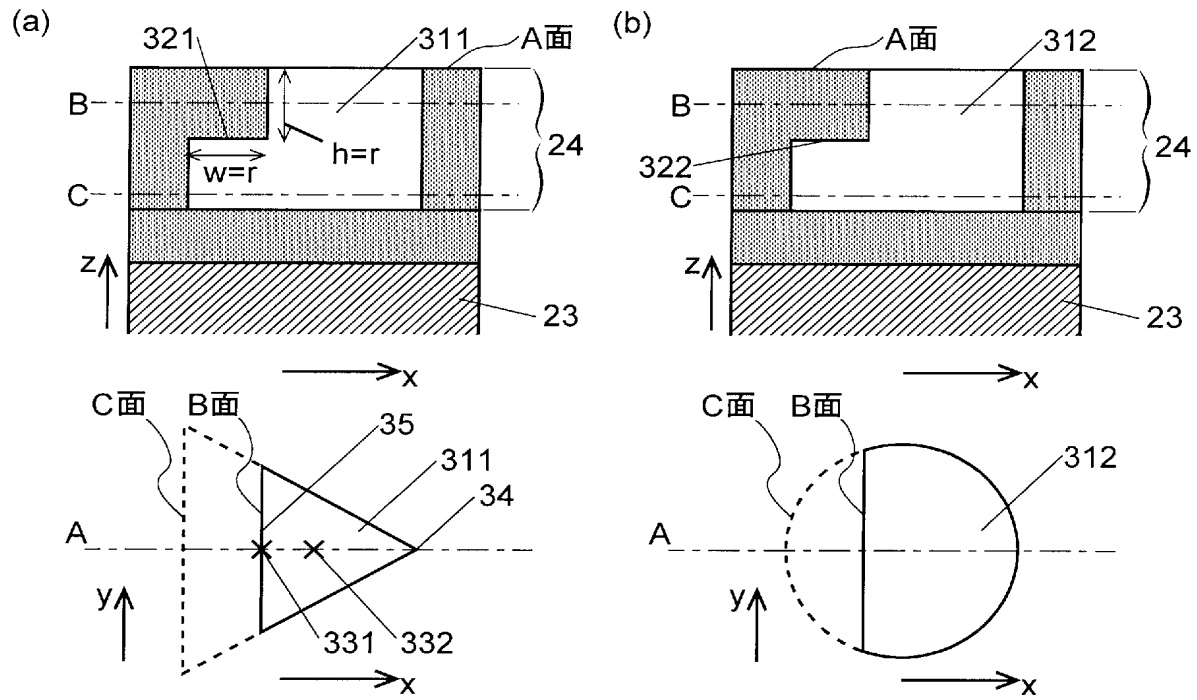
[図1]



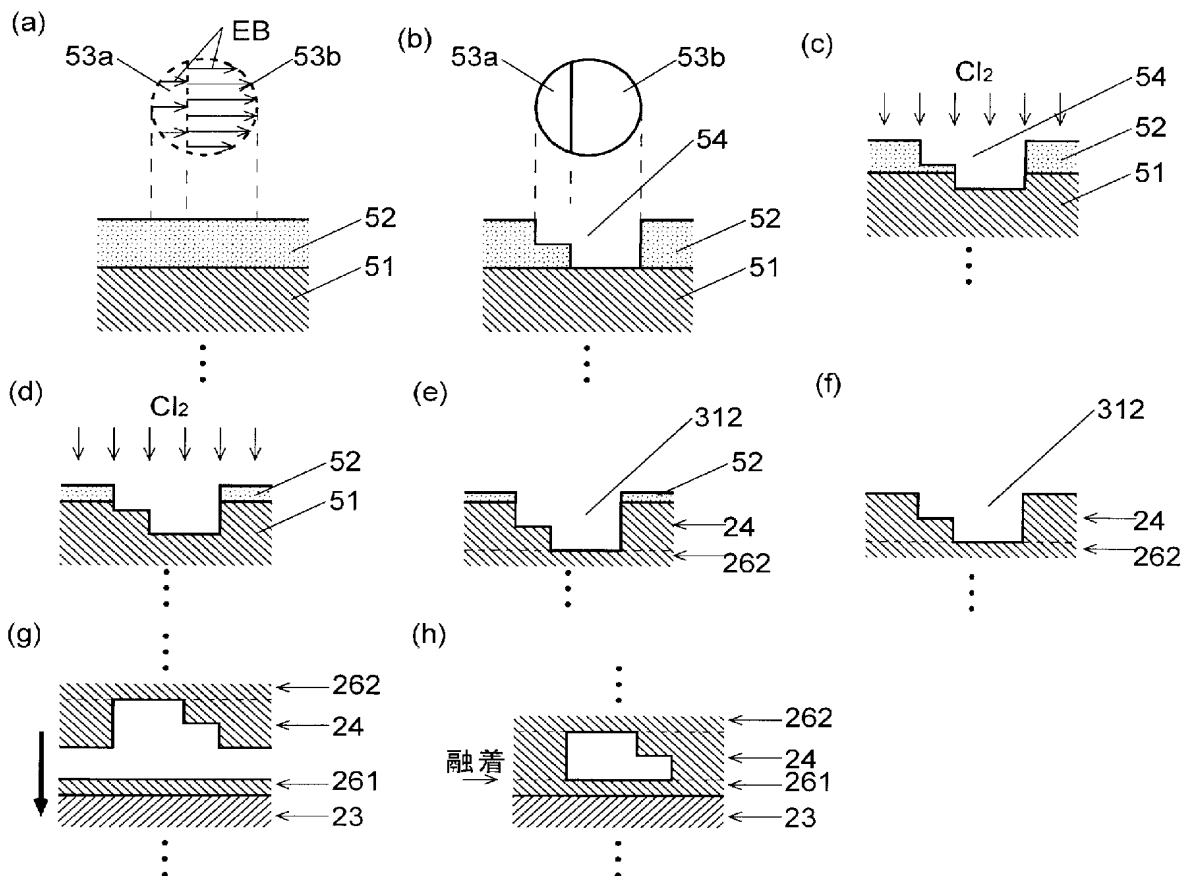
[図2]



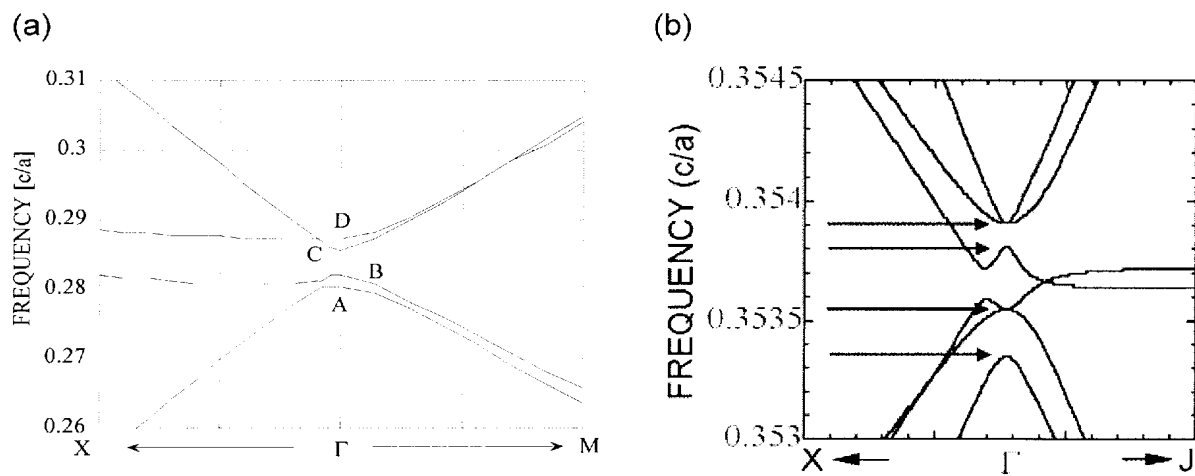
[図3]



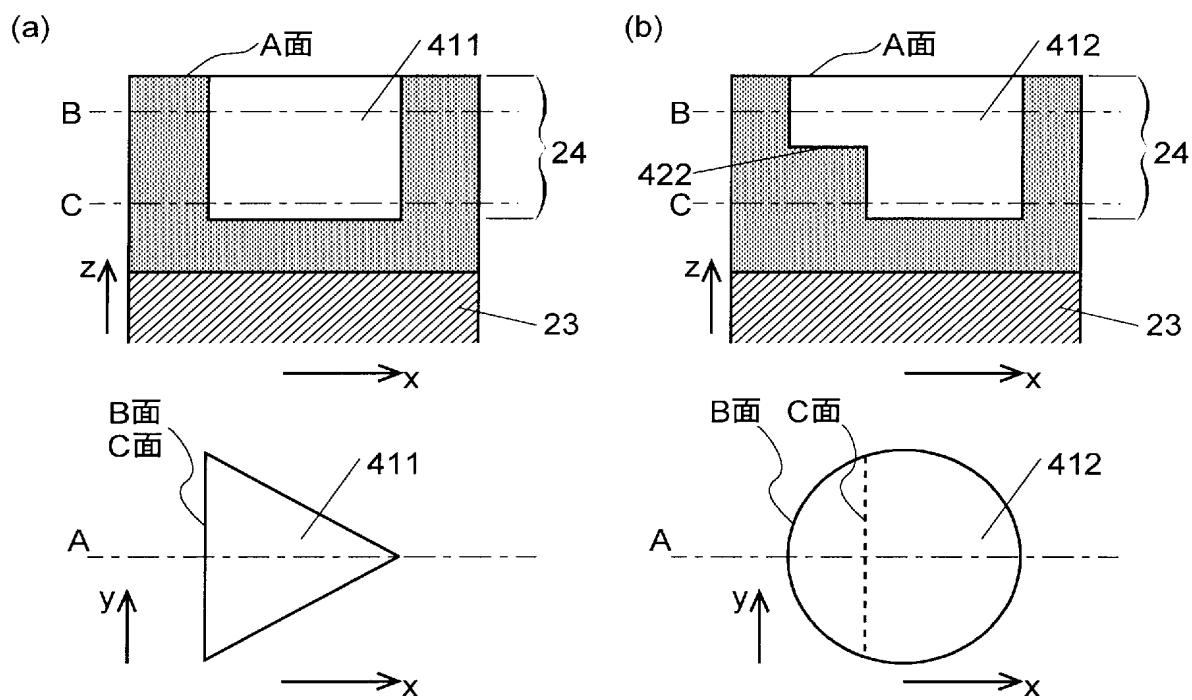
[図4]



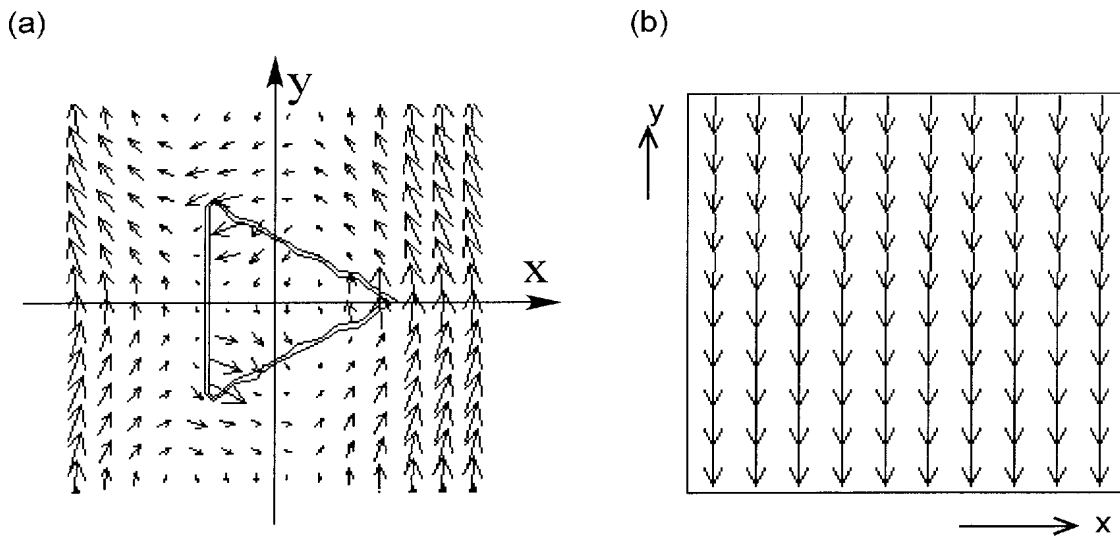
[図5]



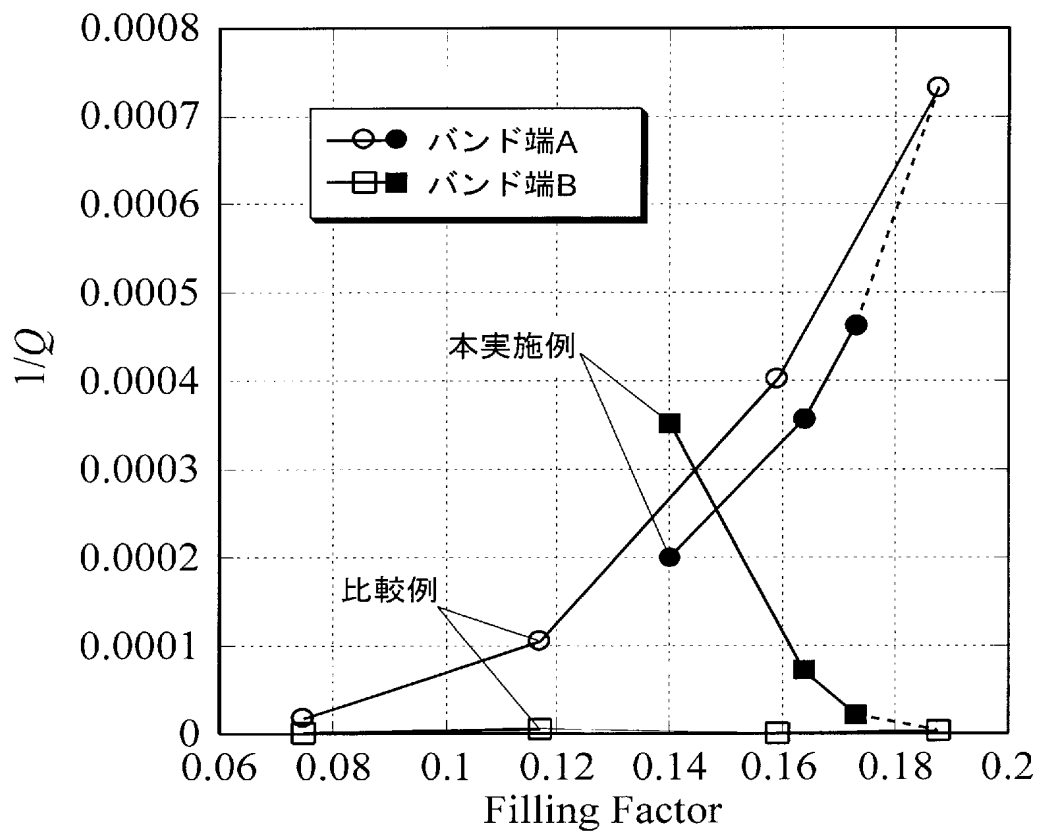
[図6]



[図7]

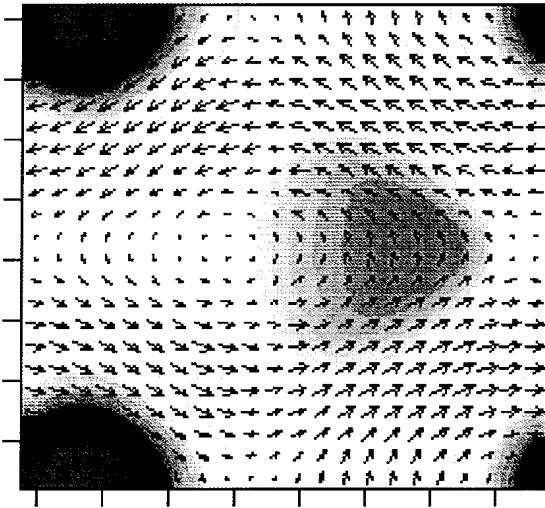


[図8]

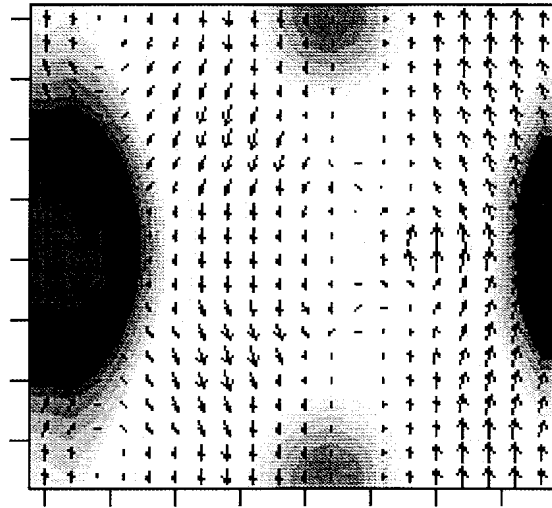


[図9]

バンド端A



バンド端B



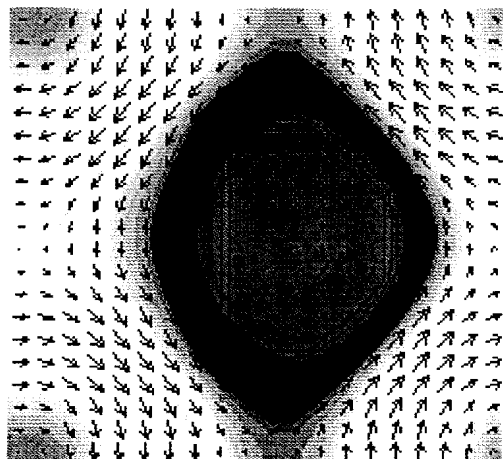
[図10]

Q値

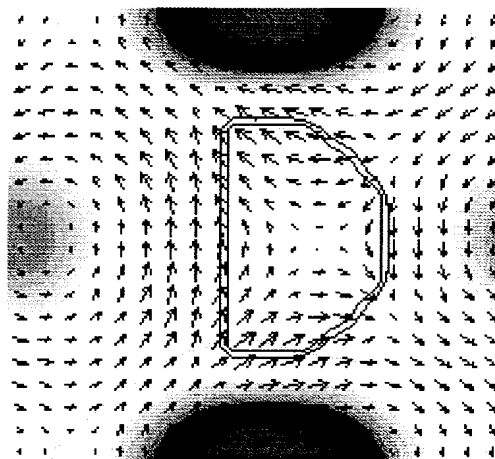
	バンドA	バンドB
本実施例 (空孔312)	5,851	1,055
比較例 (空孔412)	34,525	9,511

[図11]

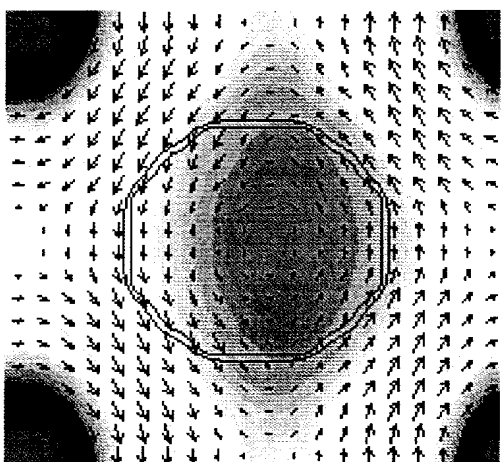
(a)本実施例（空孔312）、バンドA



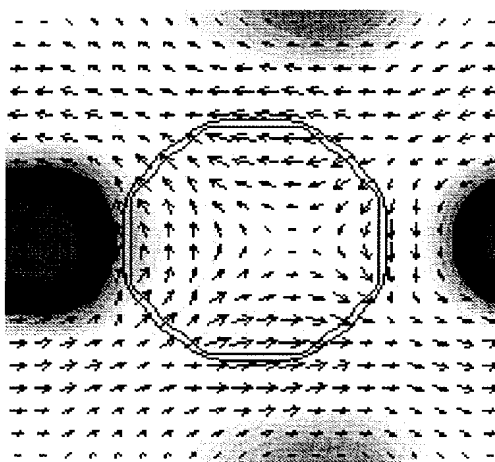
(b)本実施例（空孔312）、バンドB



(c)比較例（空孔412）、バンドA



(d)比較例（空孔412）、バンドB



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003793

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.⁷ H01S5/183

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ H01S5/00-5/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2005	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

IEEE, Science Direct, JSTPlus (JOIS), Scitation

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2003-273455 A (Japan Science and Technology Corp.), 26 September, 2003 (26.09.03), Abstract; Par. Nos. [0006], [0022] to [0034]; Figs. 1 to 5, 8 (Family: none)	1-2, 4-6
A	JP 2000-332351 A (Susumu NODA), 30 November, 2000 (30.11.00), Abstract; Par. Nos. [0023] to [0056]; Figs. 1 to 7 (Family: none)	1, 4-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T"

later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&"

document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 May, 2005 (27.05.05)

Date of mailing of the international search report

14 June, 2005 (14.06.05)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003793

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Imada, M. et al., 'Surface-emitting laser with two-dimensional photonic band structure embedded by wafer fusion technique', Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics 1999 (CLEO '99), 23-28 May 1999, pages 455 to 456	1
A	Tanaka, Y. et al., 'Theoretical investigation of a vertically asymmetric photonic crystal slab', The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2003 (CLEO/Pacific Rim 2003), Vol.2, 15-19 Dec. 2003, page 402	1
P,A	JP 2004-296538 A (Japan Science and Technology Corp.), 21 October, 2004 (21.10.04), Abstract; Claims; Fig. 1 (Family: none)	1-6

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H01S5/183

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H01S5/00-5/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

IEEE, Science Direct, JSTPlus(JOIS), Scitation

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 2003-273455 A (科学技術振興事業団) 2003.09.26, 【要約】, 【0006】, 【0022】-【0034】, 図1-5, 8 (ファミリーなし)	1-2, 4-6
A	JP 2000-332351 A (野田進) 2000.11.30, 【要約】, 【0023】-【0056】, 図1-7 (ファミリーなし)	1, 4-6

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

27.05.2005

国際調査報告の発送日

14.6.2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

笹野 秀生

2K

9519

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	Imada, M. et al., 'Surface-emitting laser with two-dimensional photonic band structure embedded by wafer fusion technique', Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics 1999 (CLEO '99), 23-28 May 1999, pp. 455 - 456	1
A	Tanaka, Y. et al., 'Theoretical investigation of a vertically asymmetric photonic crystal slab', The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2003 (CLEO/Pacific Rim 2003), Volume 2, 15-19 Dec. 2003, pp. 402	1
P A	JP 2004-296538 A (科学技術振興事業団) 2004. 10. 21, 【要約】, 特許請求の範囲, 図 1 (ファミリーなし)	1 - 6